发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷[1]

王润洲　　毕鸿燕

(中国科学院行为科学院重点实验室(中国科学院心理研究所), 北京 100101)
(中国科学院心理研究所脑科学与学习困难研究中心, 北京 100101)
(中国科学院大学心理系, 北京 100049)

摘　要 发展性阅读障碍是指个体在智力正常并且不缺乏学校教育的情况下，仍无法获得与年龄相匹配的阅读技能的一种学习障碍，其缺陷的本质一直是研究者争论的焦点。大量研究显示，阅读障碍者常表现出听觉时间加工损伤。在行为层面，阅读障碍者难以辨别快速、连续呈现刺激的顺序以及刺激本身的动态时间特征。在神经层面，阅读障碍者诱发的失匹配负波更弱且具有异常的神经同步加工。这些损伤同时存在于对言语和非言语刺激的加工中，表明听觉时间加工缺陷非言语加工所特有。未来的研究还需阐明以下几个问题：1）阅读障碍的听觉时间加工缺陷发生在哪些时间窗口，随年龄增长如何变化；2）阅读障碍听觉时间加工缺陷在神经层面的时间进程是怎样的；3）听觉时间加工缺陷是否为阅读障碍的核心缺陷。

关键词 发展性阅读障碍, 听觉时间加工, 时间顺序, 动态时间特征, 失匹配, 神经同步

1　引言

发展性阅读障碍(Developmental dyslexia, DD)是一种个体在智力正常，不缺乏学校教育和接触社会文化的机会，并且没有视、听觉功能障碍的情况下，仍然表现出难以习得流畅阅读的缺陷(Casini et al., 2018)。语音缺陷被一致地认为是拼音文字阅读障碍的核心缺陷(Casini et al., 2018; Goswami, 2015; Snowling, 2001)。研究者指出，阅读障碍者在语音的表征、存储和提取方面存在的缺陷会影响其形—音转换过程，进而损害阅读能力(Snowling, 2001)。不过，也有研究者指出，语音缺陷只是一种表象，其背后有着更为基础的一般感知觉缺陷(Lovegrove et al., 1980)。时间加工(Temporal processing, TP)是一种在认知加工过程中对时间结构(持续时间、顺序、速度或事件的规律性)进行编码、解码和评估的认知神经机制(Kotz & Schwartze, 2010)，负责对刺激时间特征的低水平加工，包括在不同感觉通道中感知刺激的持续时间、快速变化以及顺序(Grondin, 2010)。研究者认为，阅读障碍的语音技能缺陷可能源于基础的听觉时间加工缺陷(Meng et al., 2005)。上升时间(Rise time)是语音信号中的关键事件，有助于将声音信号按照时间窗口进行分段，从而提供有效的言语感知线索(Goswami,

[1]收稿日期：2020-07-14
国家自然科学基金面上项目(31671155)。
通信作者：毕鸿燕, E-mail: bihy@psych.ac.cn

2011; Goswami & Leong, 2013; Hämäläinen et al., 2012)。大脑的神经网络会使用上升时间提供的线索重置并校准神经活动，使之与语音信号同步(Gross et al., 2013)。因此，神经系统对上升时间异常的同步加工可能是发展性阅读障碍语音缺陷的神经基础(Goswami, 2011, 2018, 2019)。此外，个体还可以通过感知频率和振幅的变化对声音进行排序(Stein, 2018)，而失匹配负波(Mismatch negativity, MMN)能够很好地反映个体感知听觉信息改变的能力，也可以很好地揭示发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷。

大量行为和神经科学的研究表明，拼音文字阅读障碍者存在听觉时间加工缺陷，表现在对快速变化刺激的顺序判断准确率更低(Fostick et al., 2012, 2014; Tallal, 1980)、新异听觉时间刺激难以诱发 MMN (Corbera et al., 2006; Meng et al., 2005; Schulte-Körne et al., 1999; van Zuijen et al., 2012)以及上升时间辨别能力和神经振荡同步性能更弱(Goswami et al., 2010, 2011; Power et al., 2012, 2013, 2016; van Hirtum et al., 2019)。同样，汉语阅读障碍者也表现出了对听觉时间刺激的异常加工(e.g., Chung et al., 2008; Liu et al., 2019; Wang & Yang, 2018)，体现了阅读障碍听觉时间加工缺陷的跨语言一致性。听觉时间加工缺陷不仅会干扰语音加工，导致难以操纵形—音对应关系(Booth et al., 2000)，从而影响阅读；而且还会干扰注意的分配和动态转换，导致关键的语音信息很难被注意、及时捕捉，进而降低阅读效率(Goswami, 2011)。因此，听觉时间加工缺陷可能是导致发展性阅读障碍的原因。许多干预研究也证实，通过听觉节奏训练(Bhide et al., 2013; Flaugnacco et al., 2015)、听觉时间知觉训练(张曼莉 等, 2018; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2018)，阅读障碍者的阅读成绩可以显著提高，暗示听觉时间加工缺陷与阅读障碍之间存在一种因果关系。

本文将系统梳理发展性阅读障碍听觉时间加工缺陷的相关研究，并从该缺陷的行为特征和神经特征两方面进行综述，最后对未来的研究方向作出展望。

2 发展性阅读障碍听觉时间加工缺陷的行为特征

2.1 时间顺序加工缺陷

Tallal (1980)将时间加工定义为对快速呈现刺激的加工，对拼音文字阅读障碍者快速听觉时间加工能力的研究也始于 Tallal。在近四十年的研究中，研究者多采用对快速呈现的刺激进行时间顺序判断的范式(Temporal order judgments, TOJ, Chung et al., 2008)。Tallal 使用非言语听觉刺激，要求被试判断刺激呈现的顺序，结果表明，阅读障碍儿童难以辨别短时间间隔内(8 ~ 305 ms)呈现音调的顺序，但是当时间间隔延长到 305 ms 以上时，阅读障碍儿童的这种缺陷就会消失。同时，Tallal 还发现，非言语音调的时间加工与语音编码、单词的识别

和拼写显著相关。Nittrouer (1999)对 Tallal 的研究提出了质疑，并将听觉刺激换成 8 岁儿童更易辨别的 800 Hz 和 1200 Hz 音调。结果发现，无论时间间隔的长短，阅读障碍儿童的表现与正常儿童均无显著差异。于是，研究者认为先前研究中的听觉刺激可能难以辨别，导致了阅读障碍儿童的缺陷表现(Nittrouer, 1999)。随后，Rey 等人(2002)要求被试判断无意义音节(例如：aspa)中辅音字母的顺序，并且操纵辅音字母的持续时间。结果发现，阅读障碍儿童顺序判断的表现在刺激呈现时间较短(140 ms)时显著差于控制组儿童；但是当刺激呈现时间增加时(280 ms)，阅读障碍儿童的表现可以达到正常水平。相关分析表明，阅读障碍儿童的听觉 TOJ 成绩与语音意识以及非字拼写成绩显著相关。因此，研究者认为，感知两个连续的辅音刺激比感知音调更加困难，Nittrouer 的任务可能太过简单(Rey et al., 2002)。在汉语研究中，Meng 等人(2005)曾以中国大陆地区五年级正常儿童作为被试，要求他们判断 50 ~ 100 ms 时间间隔内连续呈现的两个音调(800 Hz 和 2000 Hz)的顺序。结果发现，儿童完成音调 TOJ 任务的成绩与多项语音和阅读能力显著相关，并且在分离出语音意识的效应后，TOJ 任务成绩可以稳定并有效解释阅读流畅性的方差变异。该结果表明听觉时间加工对汉语儿童阅读的发展也具有重要作用(Meng et al., 2005)。后续许多研究都证实了汉语阅读障碍儿童存在听觉时间加工缺陷(e.g., Chung et al., 2008; Liu et al., 2019; Wang & Yang, 2018; Wang et al., 2019)。Chung 等人(2008)招募中国香港的小学生判断不同时间间隔(8 ~ 305 ms)条件下高频(500 Hz)、低频(250 Hz)声音呈现的先后顺序。结果表明，在所有时间间隔条件下阅读障碍儿童(M_{age} = 8.90)的判断准确率都显著低于同年龄对照组儿童(M_{age} = 8.91)，但是与同阅读水平对照组儿童(M_{age} = 8.30)没有显著差异。这一结果似乎意味着汉语阅读障碍儿童只是在听觉时间加工方面发展滞后(Chung et al., 2008)。类似的，Wang 和 Yang (2018)以中国台湾地区 1 ~ 6 年级(M_{age}: 7.76 ~ 11.68)的小学生为被试执行听觉 TOJ 任务，发现 1 ~ 2 年级阅读障碍儿童的判断准确率显著低于同年级正常儿童，但是随着年级的升高，3 年级以后阅读障碍儿童在听觉 TOJ 任务中的成绩与同年级正常儿童无显著差异。不过，近期一项以 3 ~ 6 年级儿童为主要被试的研究(占全部被试的 81%)却发现，在 TOJ 任务中，阅读障碍儿童(M_{age} = 9.82)的成绩显著差于正常儿童(M_{age} = 9.66)，并且在控制了年龄和非言语智力后这种差异仍然存在(Liu et al., 2019)。此外，研究发现，阅读障碍成人也存在听觉时间加工缺陷(e.g., Fostick et al., 2012, 2014)。Fostick 等人(2012)发现，与正常阅读者相比，阅读障碍成人在听觉时间加工任务(TOJ 和时间间隙检测)中的表现更差，即使在控制了工作记忆的影响后也是如此，但在强度知觉任务中没有发现差异。该结果表明当听觉识别基于时间操作时，成人

阅读障碍者相对于正常阅读者表现出特定的缺陷，这既不能归因于听觉加工中的一般知觉缺陷，也不能归因于工作记忆缺陷(Fostick et al., 2012)。随后，Fostick 等人(2014)采用双耳TOJ 任务对阅读障碍成人进行听觉时间加工训练研究。在研究中，不同时间间隔(5 ~ 240 ms)的一对音调刺激(频率和强度相同)通过双耳先后呈现给被试，要求被试判断左右耳音调出现的先后顺序。经过 5 天的训练，阅读障碍成人与正常成人的假字阅读成绩和语音意识成绩都得到了显著的提高，而没有进行听觉时间加工训练的阅读障碍和正常成人被试的成绩无显著改变(Fostick et al., 2014)。上述非言语研究的结果也表明发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷是一种更为普遍的一般感知觉缺陷，而不是仅针对言语刺激的加工缺陷。

不过，阅读障碍的听觉时序加工缺陷并不仅仅表现在对快速呈现刺激的加工上 。Cestnick 和 Jerger (2000)使用听觉 TOJ 任务发现，无论刺激呈现快慢(快速：8 ~ 305 ms，慢速：428 ms)，阅读障碍儿童的判断正确率都显著小于正常儿童。而随后的一项大样本追踪研究(Share et al., 2002)则发现，二年级被诊断为阅读障碍的儿童，在 3 年前的听觉 TOJ 测验中，长时间间隔条件(428 ms)下的判断正确率显著低于同年龄正常儿童，短时间间隔条件(8 ~ 305 ms)下判断正确率的差异边缘显著($p = 0.07$)。研究者认为 Tallal 在任务中使用了过多的训练和测验试次，导致被试从额外的练习中获得了经验，对长时间间隔的知觉变得更加容易，从而削弱了阅读障碍儿童和正常儿童的差异(Share et al., 2002)。因此，阅读障碍的听觉时间加工缺陷似乎并不局限于短暂的时间窗口，这种缺陷究竟存在于广泛的时间域还是某些特定的时间窗口(例如：语言成分对应的时间窗口)仍需进一步的研究。

2.2 动态时间特征加工缺陷

Studdert-Kennedy 和 Mody (1995)指出，虽然对刺激的识别是时间顺序判断的先决条件，但是只有当刺激的特征在时间上发生动态变化时，对刺激加工才是时间加工。在听觉 TOJ 任务中表现不佳的阅读障碍者可能存在来源未知的辨别能力缺陷，而不一定是听觉时间顺序加工缺陷(Studdert-Kennedy & Mody, 1995)。因此，一部分研究者尝试从听觉系统编码声音的动力学角度(例如：振幅上升时间、频率调制检测)考察发展性阅读障碍者听觉时间加工的行为特征。Witton 等人(1998)向成人被试呈现一个纯音和调频(FM)音刺激对，两个声音刺激以随机的顺序呈现，要求被试报告第几个声音是 FM 音。当声音频率的调制速率为 2 Hz 和 40 Hz 时，阅读障碍成人的 FM 检测阈值更高，更不敏感。但是当声音频率的调制速率为 240 Hz 时，阅读障碍者的检测阈值与正常被试无显著差异。研究者指出，感知 2 Hz 与 40 Hz 的调频音时更多依靠时间线索，而对 240 Hz 调频音的感知则依靠频谱线索，实验结果反映

了阅读障碍成人对具有动态时间属性的听觉刺激不敏感(Witton et al., 1998)。值得注意的是，阅读障碍者在低频调制(2 Hz)和高频调制(40 Hz)条件下都表现出了加工缺陷，这似乎从侧面说明了阅读障碍的听觉时间加工缺陷存在于更广泛的时间域。上升时间是语音信号中的关键事件，反映了振幅调制的模式，这种模式有助于将声音信号(例如：音节)按时间窗口进行分段(Goswami, 2018)，从而提供有效的言语感知线索(Goswami, 2011; Goswami & Leong, 2013; Hämäläinen et al., 2012)。Goswami 等人(2010)在英格兰南部进行的一项追踪研究发现，在振幅上升时间辨别任务中(非言语音调)，阅读障碍儿童的辨别阈限显著高于同年龄对照组儿童以及年龄较小的同阅读水平对照组儿童(Goswami et al., 2010)。随后，Goswami 等人(2011)使用相同的上升时间辨别测验，考察了英国、西班牙和中国台湾地区发展性阅读障碍儿童的一般感知觉缺陷。结果表明，三个地区阅读障碍儿童的上升时间辨别阈限都显著高于同年龄对照组儿童，并且上升时间辨别阈限均可显著预测语音意识和阅读成绩，表明上升时间辨别能力受损是发展性阅读障碍的一种普遍存在的感知觉缺陷，具有跨语言一致性(Goswami et al., 2011)。此外，对具有阅读障碍家族遗传风险的学龄前儿童的研究同样发现了上升时间辨别能力受损的现象，高风险儿童的上升时间辨别阈限显著高于低风险儿童，并且上升时间辨别阈限与音节意识显著相关：辨别阈限越低，音节意识得分越高(Law et al., 2017)。近期的研究(Kalashnikova et al, 2018, 2019)还考察了婴儿时期个体对上升时间的知觉敏感性与其儿童时期语言能力的关系，结果发现，具有阅读障碍家族遗传风险的 10 月龄婴儿对振幅上升时间的敏感性显著差于同年龄控制组婴儿(Kalashnikova et al., 2018)；控制组 7 月龄婴儿的上升时间辨别阈限显著高于 10 月龄的婴儿(敏感性随年龄增加而增强)，但在风险组中没有发现这种随年龄增长敏感性提高的趋势。并且，婴儿时期上升时间辨别阈限可以预测他们 3 岁时的词汇水平。因此，研究者认为，婴儿对上升时间的敏感性是日后口语和书面语损伤的重要发展性标志(Kalashnikova et al., 2019)。综上所述，发展性阅读障碍者具有听觉时间加工缺陷，这种缺陷跨语言存在并且贯穿个体发展的各个阶段，是阅读障碍的固有缺陷。

3 发展性阅读障碍听觉时间加工缺陷的神经特征

3.1 失匹配负波的异常表现

在神经层面，新异听觉时间刺激诱发的 MMN 可以反映发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷。Schulte-Körne 等人(1999)在被试观看无声电影时向他们呈现持续时间不同的四个连续非言语纯音调刺激，标准刺激占 85%，新异刺激占 15%。结果发现，阅读障碍成人相对

于正常成人在 225 ~ 600 ms 的时间窗中有一个显著更小的 MMN 波幅。这一结果表明，阅读障碍成人对快速时间信息的加工存在缺陷(Schulte-Körne et al., 1999)。Meng 等人(2005)以中国大陆的阅读障碍儿童为被试，使用被动 oddball 范式，发现阅读障碍儿童对新异时间间隔刺激诱发的 MMN 平均波幅也小于正常儿童(Meng et al., 2005)。Corbera 等人(2006)使用类似的被动任务考察了阅读障碍儿童对新异听觉刺激的神经反应。在频率条件下，标准刺激的频率为 500 Hz (占 80%)，新异刺激的频率为 550 Hz；在持续时间条件下，标准刺激的持续时间为 100 ms (占 80%)，新异刺激的持续时间为 33 ms。结果发现，在持续时间条件下，阅读障碍儿童 MMN 的平均振幅和潜伏期显著大于同年龄正常儿童，但是在频率条件下二者没有显著差异。这表明阅读障碍儿童的听觉加工缺陷来自于对时间线索的分辨能力(Corbera et al., 2006)。van Zuijen 等人(2012)对具有阅读障碍家族遗传风险的幼儿进行了一项追踪研究，在幼儿 17 月龄时执行被动 oddball 范式并记录他们的 EEG 数据。研究发现，具有阅读障碍家族遗传风险的幼儿在加工新异时间间隔刺激时没有诱发显著的失匹配反应(Mismatch response, MMR)，但是控制组幼儿出现了显著的 MMR。结合后续的行为测量发现，幼儿在 17 月龄时额—中央区的 MMR 波幅与 53 月龄时的语言理解成绩以及二年级结束时真词、假词的阅读流畅性显著相关。上述研究表明 MMN 和 MMR 可以作为发展性阅读障碍的神经标记，适用于不同语言、不同年龄的个体。不过，这些研究仅考察了阅读障碍者辨别新异听觉时间刺激的神经机制，而对更一般的听觉时间加工的神经机制以及这种神经机制随时间的变化进程仍有待进一步研究。

3.2 神经振荡同步的异常表现

除了 MMN，神经振荡的同步性也可以反映发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷。大脑能以不同的速率从语音流中获取信息的时间“样本”，从而使不同频段的神经振荡与输入信息中的相似频段进行同步和相位锁定(Phase locking)，最后将这些频段的信息绑定在一起进行语音感知(Goswami, 2019; Power et al., 2012)。神经相位锁定对语音信号的时间编码和解析(特别是与音节调制速率一致的 θ 频段以及与音素调制速率一致的 γ 频段)以及语言的习得和发展至关重要，而评估神经振荡同步的研究方法则有助于探索诸如阅读障碍这种涉及时间采样缺陷的发展性学习困难(Power et al., 2012)。Power 等人(2013)使用韵律同步任务并记录 EEG 数据来考察发展性阅读障碍儿童对节律性语音的神经同步表现。听觉韵律型语音由多次重复的音节“ba”构成，频率为 2 Hz (δ 频段)。在音节重复的过程中会有违反频率规则的音节出现，被试需要对这个违规音节进行按键反应(但不对该反应进行分析)。结果发现，

阅读障碍儿童 δ 频段的神经振荡同步异常，他们对 δ 频段调制信息的神经反应比正常阅读者平均延迟 12.8 ms，即最优相位(Preferred phase)存在差异。最优相位反映了在一个振荡周期中(从激活到抑制)大多数神经元放电的时间点，如果代表神经元最大兴奋性的振荡峰值出现在语音信号携带较少信息的时间点(例如：神经振荡与振幅调制信息非同相)，语音感知将会受到不利影响(Goswami, 2019)。因此，语音加工的听觉时间参考框架在发展性阅读障碍儿童中是异常的，表现在低频振荡同步的是语音输入的不同相位，这将影响语音编码的质量，并且可能是语音表征损伤的基础(Power et al., 2013)。随后，Power 等人(2016)选取了先前一项纵向行为研究(Goswami et al., 2013)的被试，要求他们重复语义上不可预测但语法正确的句子(例如：“Arcs blew their cough”)以及判断同一个单词两次发音的重音是否相同，并结合 EEG 数据测量低频语音包络编码的准确性来探讨发展性阅读障碍语音缺陷的神经基础。对 EEG 进行重构后发现，阅读障碍儿童 δ 频段调幅的同步准确性显著差于同年龄对照组以及同阅读水平对照组儿童(Power et al., 2016)，结果同样说明阅读障碍儿童对 δ 频段时间模式的神经振荡同步受损。对于阅读障碍成人，Lehongre 等人(2013)考察了他们在观看电影时听觉皮层神经振荡的特征。结果发现，阅读障碍成人在 $\delta \sim \theta$ 频段的神经振荡与控制组被试没有显著差异，但是阅读障碍成人相对于正常成人丧失了 γ 振荡的偏侧化。研究者认为这种异常的神经振荡会干扰音素的获得与表征(Lehongre et al., 2013)。van Hirtum 等人(2019)使用非言语听觉刺激，通过测量具有不同包络上升时间的 θ (4 Hz)、α (10 Hz)、β (20 Hz)和低频 γ (40 Hz)频段调幅刺激的听觉稳态反应(Auditory steady-state response, ASSR)考察阅读障碍成人的神经振荡同步性。结果发现，阅读障碍成人相对于正常成人在 α、β 和低频 γ 频段条件下的信噪比(SNR)更低、神经振荡同步更弱，并且在 α 和 β 频段条件下只有当上升时间更短时才会出现这种效应。这种对语音信号的异常神经同步并不是源于语言层面的加工缺陷，而是对嵌入语音中的时间线索的感知觉缺陷(van Hirtum et al., 2019)。该非言语神经研究结果与前文行为层面的结果共同支持了这样一种观点，即发展性阅读障碍的时间加工缺陷是一种发生在基础感知觉层面上，超越了刺激特征和任务性质的广泛性认知功能失调(张曼莉等, 2018)。上述神经研究一方面说明了在一个或多个频率上的时间采样缺陷和低效的相位锁定可以解释阅读障碍跨语言的异常语音发展(Casini et al., 2018)；另一方面也从神经层面反映了阅读障碍者听觉时间加工的发展特点，即阅读障碍儿童更多的在低频时间调制中存在异常的神经同步(e.g., δ 频段, Power et al., 2013, 2016)，而阅读障碍成人更多的在高频时间调制中存在异常的神经同步(e.g., γ 频段, Lehongre et al., 2013; van Hirtum et al., 2019)。Goswami

(2011)提出了时间采样框架(Temporal sampling framework, TSF)模型，将发展性阅读障碍对振幅包络上升时间的感知困难和低频(δ 和 θ 频段)神经振荡机制对输入信息的时间采样受损整合在一起，用来说明发展性阅读障碍异常的时间编码以及语音的感知觉缺陷。根据 TSF 的观点，阅读障碍很可能会出现语音缺陷，因为基础的听觉加工从出生时就是异常的，婴儿时期对低频时间调制的加工缺陷会削弱韵律敏感性，并损害语音发展(Goswami, 2011)。因此，对低频时间调制的异常反应更可能出现在早期发展阶段(Cutini et al., 2016)。γ 频段的振幅调制(Goswami & Leong, 2013)和持续时间(Rufener et al., 2019)对应着音素的表征与加工，而音素意识是学习阅读的结果(Ziegler & Goswami, 2005)。因此，在学校教育期间，当形—音学习被整合进语音的神经表征后，异常的 γ 振荡活动就会出现(Cutini et al., 2016)。上述神经振荡同步的研究也表明阅读障碍的听觉时间加工缺陷可能存在于更广阔的时间域，其表现出的发展特点似乎还暗示了听觉时间加工缺陷的窗口会随年龄增加而减小，这些都有待于进一步研究。

4 总结与展望

综上所述，听觉时间加工缺陷是一种产生于基础感知觉层面，跨越语言和年龄层次的一般感知觉缺陷，可能是发展性阅读障碍语音缺陷背后的核心缺陷。不过，目前对于发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷研究还存在许多问题没有得到充分解释，需要在以下几个方面深入研究。(1) 发展性阅读障碍听觉时间加工缺陷存在的时间窗口及其发展特点。由于不同的时间窗口(40 ~ 4000 ms)与不同水平的语言概念(如音节、词汇和韵律短语)对应(Ghitza & Greenberg, 2009)，而跨语言的语音意识发展规律是由较大粒度的语音单元(如重音节)向较小粒度的语音单元(如音素)发展(Goswami, 2018)。据此推测发展性阅读障碍的听觉时间加工缺陷可能仅存在于与语言成分对应的时间窗口，并且该时间窗口可能会随年龄的增长逐渐变小。未来可结合横断研究、追踪研究考察这一问题。(2) 听觉时间加工缺陷是造成发展性阅读障碍的首要缺陷还是注意缺陷、工作记忆缺陷的继发缺陷。先前的研究表明阅读障碍者还伴随着注意缺陷和工作记忆缺陷，而先前研究使用的诸如 TOJ 任务的测验并没有排除注意和工作记忆差异所带来的影响。今后，可设置控制条件来探查听觉时间加工缺陷是否为造成发展性阅读障碍的首要缺陷。(3) 阅读障碍听觉时间加工在神经上的时间进程。N1、P2、CNV (contingent negative variation)和 LPCt (late positive component of timing)分别对应时间加工的选择性注意、认知资源分配、时间编码和和时间辨别。但是，当前神经层面的研究仅通过 MMN 证实了阅读障碍者存在听觉时间加工缺陷，并未探明这种听觉时间加工缺陷发生在

加工的哪一阶段，未来可以使用高时间分辨率的 ERP 技术进一步探索该问题，以增加对阅读障碍听觉时间加工缺陷神经机制的了解。

参考文献

张曼莉, 孟祥芝, 郑小蓓. (2018). 中文阅读障碍儿童的时间加工缺陷: 来自知觉学习干预研究的证据. *心理与行为研究*, *16*(5), 583–593.

Bhide, A., Power, A., & Goswami, U. (2013). A rhythmic musical intervention for poor readers: A comparison of efficacy with a letter-based intervention. *Mind, Brain, and Education*, *7*(2), 113–123.

Booth, J. R., Perfetti, C. A., MacWhinney, B., & Hunt, S. B. (2000). The association of rapid temporal perception with orthographic and phonological processing in reading impaired children and adults. *Scientific Studies of Reading*, *4*, 101–132.

Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It's about time: Revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science*, *21*(2), e12530.

Cestnick, L., & Jerger, J. (2000). Auditory temporal processing and lexical/nonlexical reading in developmental dyslexics. *Journal of the American Academy of Audiology*, *11*(9), 491–503.

Chung, K. K., McBride-Chang, C., Wong, S. W., Cheung, H., Penney, T. B., & Ho, C. S. H. (2008). The role of visual and auditory temporal processing for Chinese children with developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *58*(1), 15–35.

Corbera, S., Escera, C., & Artigas, J. (2006). Impaired duration mismatch negativity in developmental dyslexia. *Neuroreport*, *17*(10), 1051–1055.

Cutini, S., Szűcs, D., Mead, N., Huss, M., & Goswami, U. (2016). Atypical right hemisphere response to slow temporal modulations in children with developmental dyslexia. *NeuroImage*, *143*, 40–49.

Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S., & Schön, D. (2015). Music training increases phonological awareness and reading skills in developmental dyslexia: A randomized control trial. *PLoS ONE*, *10*(9), e0138715.

Fostick, L., Bar-El, S., & Ram-Tsur, R. (2012). Auditory temporal processing as a specific deficit among dyslexic readers. *Psychology Research*, *2*, 77–88.

Fostick, L., Eshcoli, R., Shtibelman, H., Nechemya, R., & Levi, H. (2014). The efficacy of temporal processing training to improve phonological awareness among dyslexic students. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*, 1799–1807.

Ghitza, O., & Greenberg, S. (2009). On the possible role of brain rhythms in speech perception: Intelligibility of time-compressed speech with periodic and aperiodic insertions of silence. *Phonetica*, *66*, 113–126.

Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(1), 3–10.

Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(1), 43–54.

Goswami, U. (2018). A neural basis for phonological awareness? An oscillatory temporal-sampling perspective. *Current Directions in Psychological Science*, *27*(1), 56–63.

Goswami, U. (2019). A neural oscillations perspective on phonological development and phonological processing in developmental dyslexia. *Language and Linguistics Compass*, *13*(5), e12328.

Goswami, U., Gerson, D., & Astruc, L. (2010). Amplitude envelope perception, phonology and prosodic sensitivity in children with developmental dyslexia. *Reading and Writing*, *23*(8), 995–1019.

Goswami, U., & Leong, V. (2013). Speech rhythm and temporal structure: Converging perspectives. *Laboratory Phonology*, *4*(1), 67–92.

Goswami, U., Mead, N., Fosker, T., Huss, M., Barnes, L., & Leong, V. (2013). Impaired perception of syllable stress in children with dyslexia: A longitudinal study. *Journal of Memory and Language*, *69*(1), 1–17.

Goswami, U., Wang, H. L. S., Cruz, A., Fosker, T., Mead, N., & Huss, M. (2011). Language-universal sensory deficits in developmental dyslexia: English, Spanish, and Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(2), 325–337.

Grondin, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *72*(3), 561–582.

Gross, J., Hoogenboom, N., Thut, G., Schyns, P., Panzeri, S., Belin, P., & Garrod, S. (2013). Speech rhythms and multiplexed oscillatory sensory coding in the human brain. *PLoS Biology*, *11*(12), e1001752.

Hämäläinen, J. A., Rupp, A., Soltész, F., Szücs, D., & Goswami, U. (2012). Reduced phase locking to slow amplitude modulation in adults with dyslexia: An MEG study. *NeuroImage*, *59*(3), 2952–2961.

Kalashnikova, M., Goswami, U., & Burnham, D. (2018). Mothers speak differently to infants at-risk for dyslexia. *Developmental Science*, *21*(1), e12487.

Kalashnikova, M., Goswami, U., & Burnham, D. (2019). Sensitivity to amplitude envelope rise time in infancy and vocabulary development at 3 years: A significant relationship. *Developmental Science*, e12836.

Kotz, S. A., & Schwartze, M. (2010). Cortical speech processing unplugged: A timely subcortico-cortical framework. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(9), 392–399.

Law, J. M., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2017). The influences and outcomes of phonological awareness: A study of MA, PA and auditory processing in pre-readers with a family risk of dyslexia. *Developmental Science*, *20*(5),

e12453.

Lehongre, K., Morillon, B., Giraud, A. L., & Ramus, F. (2013). Impaired auditory sampling in dyslexia: Further evidence from combined fMRI and EEG. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 454.

Liu, S., Wang, L. C., & Liu, D. (2019). Auditory, visual, and cross-modal temporal processing skills among Chinese children with developmental dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, *52*(6), 431–441.

Lovegrove, W. J., Bowling, A., Badcock, D., & Blackwood, M. (1980). Specific reading disability: Differences in contrast sensitivity as a function of spatial frequency. *Science*, *210*(4468), 439–440.

Meng, X. Z., Sai, X. G., Wang, C. X., Wang, J., Sha, S. Y., & Zhou, X. L. (2005). Auditory and speech processing and reading development in Chinese school children: Behavioural and ERP evidence. *Dyslexia*, *11*(4), 292–310.

Nittrouer, S. (1999). Do temporal processing deficits cause phonological processing problems? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *42*(4), 925–942.

Power, A. J., Colling, L. J., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2016). Neural encoding of the speech envelope by children with developmental dyslexia. *Brain and Language*, *160*, 1–10.

Power, A. J., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2012). Neural entrainment to rhythmically presented auditory, visual, and audio-visual speech in children. *Frontiers in Psychology*, *3*, 216.

Power, A. J., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2013). Neural entrainment to rhythmic speech in children with developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 777.

Rey, V., De Martino, S., Espesser, R., & Habib, M. (2002). Temporal processing and phonological impairment in dyslexia: Effect of phoneme lengthening on order judgement of two consonants. *Brain and Language*, *80*, 576–591.

Rufener, K. S., Krauel, K., Meyer, M., Heinze, H. J., & Zaehle, T. (2019). Transcranial electrical stimulation improves phoneme processing in developmental dyslexia. *Brain Stimulation*, *12*(4), 930–937.

Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1999). Pre-attentive processing of auditory patterns in dyslexic human subjects. *Neuroscience Letters*, *276*(1), 41–44.

Share, D. L., Jorm, A. F., Maclean, R. O. D., & Matthews, R. (2002). Temporal processing and reading disability. *Reading and Writing*, *15*(1-2), 151–178.

Snowling, M. J. (2001). From language to reading and dyslexia. *Dyslexia*, *7*(1), 37–46.

Studdert-Kennedy, M., & Mody, M. (1995). Auditory temporal perception deficits in the reading-impaired: A critical review of the evidence. *Psychonomic Bulletin and Review*, *2*(4), 508–514.

Stein, J. (2018). What is developmental dyslexia. *Brain Sciences*, *8*, 26.

Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and*

Language, *9*(2), 182–198.
van Hirtum, T., Ghesquière, P., & Wouters, J. (2019). Atypical neural processing of rise time by adults with dyslexia. *Cortex*, *113*, 128–140.
van Zuijen, T. L., Plakas, A., Maassen, B. A., Been, P., Maurits, N. M., Krikhaar, E., ... & van der Leij, A. (2012). Temporal auditory processing at 17 months of age is associated with preliterate language comprehension and later word reading fluency: An ERP study. *Neuroscience Letters*, *528*(1), 31–35.
Wang, L. C., & Yang, H. M. (2018). Temporal processing development in Chinese primary school-aged children with dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, *51*(3), 302–312.
Wang, L. C., Liu, D., & Xu, Z. (2019). Distinct effects of visual and auditory temporal processing training on reading and reading-related abilities in Chinese children with dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *69*(2), 166–185.
Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., ... & Green, G. G. R. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, *8*(14), 791–797.
Zhang, M., Xie, W., Xu, Y., & Meng, X. (2018). Auditory temporal perceptual learning and transfer in Chinese-speaking children with developmental dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, *74*, 146–159.
Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, *131*(1), 3–29.

Auditory temporal processing deficits in developmental dyslexia

WANG Runzhou, BI Hongyan

(*CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

(*Center for Brain Science and Learning Difficulties, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

(*Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Developmental dyslexia is a neurological disorder characterized by a specific deficit in reading, despite adequate intelligence and socioeconomic opportunity. A large number of studies have revealed that dyslexics usually exhibit impaired auditory temporal processing. At the behavioral level, dyslexics struggle to discriminate the sequence of rapid and successive stimuli as well as dynamical temporal characteristics. At the neural level, dyslexics evoke weaker mismatch negativity (MMN) and have abnormal neural synchronization. These deficits have been found in

the processing of both verbal and non-verbal stimuli, suggesting that such deficits are not specific to speech processing. Further studies are needed to elucidate the following questions: 1) the temporal windows in which auditory temporal processing deficits occur in dyslexia, and how will they change with age; 2) what is the neural time course of auditory temporal processing deficits in dyslexia; 3) whether auditory temporal processing deficits are core causes of dyslexia.

Keywords: developmental dyslexia, auditory temporal processing, temporal sequence, dynamic temporal feature, mismatch, neural synchronization